

## PROCESOR ENERGII W ENERGETYCE

Zenon ORŁOWSKI, Tomasz GAŁKA

Instytut Energetyki, 02-981 Warszawa, ul. Augustówka 5  
tel. (22) 642 7666 w.230, fax (22) 642 8378, e-mail [T.Galka@ien.com.pl](mailto:T.Galka@ien.com.pl)

### 1. Wstęp

Podstawą ilościowego wnioskowania diagnostycznego jest porównanie aktualnego poziomu drgań z wartościami kryterialnymi, zwłaszcza wartością graniczną: stwierdzenie jej przekroczenia pozwala na podejmowanie decyzji dotyczących dalszej eksploatacji. Aby decyzje te były uzasadnione, konieczna jest oczywiście wiarygodna metoda określania granicznych poziomów drgań.

Teoretyczną podstawą dla procedur określania granicznych wartości symptomów diagnostycznych może być model procesora energii, opracowany przez C.Cempla i opisany w szeregu publikacji (patrz np. [1,2]). Przypomnijmy, że w myśl tego modelu stan techniczny obiektu, rozumiany jako zaawansowanie procesów wyczerpania żywotności, ocenia się na podstawie mocy procesów resztkowych. Przy pewnych założeniach co do liniowości i stacjonarności wyraża się ona prostą zależnością

$$\left(\frac{V}{V_0}\right) = \left(1 - \frac{\theta}{\theta_b}\right)^{-1}, \quad (1)$$

gdzie  $V$  oznacza moc procesów resztkowych,  $\theta$  - czas,  $\theta_b$  - czas awarii (rozumianej tu jako nieodwracalna 'śmierć' obiektu) oraz  $V_0 = V(\theta = 0)$ . Ponieważ moc procesów resztkowych jest na ogół niemierzalna, o stanie obiektu wnioskujemy pośrednio, na podstawie mierzalnych symptomów. Wartość symptomu jest związana z mocą procesów resztkowych przez operator symptomowy  $\Phi$ :

$$S(\theta) = \Phi[V(\theta)], \quad 0 \leq \theta \leq \theta_b, \quad (2)$$

Podstawowy model procesora energii można rozbudować tak, aby uwzględniał zależność mocy procesów resztkowych (a więc i wartości symptomów diagnostycznych) nie tylko od stopnia zaawansowania procesów ubytku żywotności, ale również od innych czynników.

Urządzenia energetyczne, w tym turbozespoły, stanowią jeden z najbardziej spektakularnych przykładów obiektów przetwarzających energię. Adaptacja modelu procesora energii dla takich obiektów została opisana w [3]. Uwzględniono w niej zależność mocy procesów resztkowych od obciążenia czynnego i wektora logistycznego oraz wpływ remontów, w trakcie których następuje częściowe odwrócenie początkowego stanu obiektu (odpowiadającego  $\theta = 0$ ). Równanie (1), przedstawiające

zależność mocy procesów resztkowych od czasu, zostaje zastąpione przez

$$V_i(\theta, \Theta) = V_{00} X_i \left(1 - X_i \frac{\theta}{\theta_{b0}}\right)^{-1} \quad (3)$$

gdzie

$$X_i = f(L^i)g(P_{wi})h(\Theta_{0i}) \quad (4)$$

$f(L^i)$  jest skalarną miarą wektora logistycznego [1],  $g(P_{wi})$  opisuje zależność od mocy czynnej (obciążenia), zaś  $h(\Theta_{0i})$  reprezentuje wpływ procesów degradacji nieodwracalnej (tzn. takiej, której skutki nie mogą zostać usunięte podczas remontu). Indeksy  $i$  odnoszą się do  $i$ -tego cyklu między kolejnymi remontami (rozumianemu tu jako  $i$ -ty cykl życia obiektu). Konsekwencją podziału procesów degradacyjnych na odwracalne i nieodwracalne [3] jest 'podwójna' zależność od czasu:  $\theta$  oznacza tu czas liczony w każdym cyklu od zera, natomiast czas  $\Theta$  jest liczony od chwili rozpoczęcia eksploatacji (przy czym  $\Theta_{0i}$  odpowiada początkowi  $i$ -tego cyklu i jest sumą czasów wszystkich poprzednich cykli).

Należy pamiętać, że zależność (3) została sformułowana przy założeniach dość rygorystycznych, choć uzasadnionych dla warunków eksploatacji bloków podstawowych w energetyce zawodowej. Mimo tych założeń i wynikających z nich uproszczeń dochodzi zatem do znacznej komplikacji opisu matematycznego.

W obiektach realizujących największy ilościowy proces technologiczny opanowane przez człowieka (a procesem tym jest właśnie produkcja energii elektrycznej) intuicyjnie można spodziewać się istotnego wpływu intensywności przetwarzania energii, której miarą jest obciążenie (moc czynna) turbozespołu. Źródła literaturowe pozwalają w zasadzie jedynie na wyciągnięcie jakościowego wniosku, że wpływ taki rzeczywiście powinien być wzięty pod uwagę.

Podstawowa trudność wynika z faktu, że zależność między obciążeniem (mocą) turbiny a wartościami symptomów diagnostycznych nie ma charakteru bezpośredniego. Należałoby raczej powiedzieć, że zarówno moc turbiny, jak i wartości tych symptomów są funkcją tego samego wektora wielkości wejściowych. Sprawia to, że najbardziej celowe wydaje się empiryczne oszacowanie występującej w powyższych wzorach zależności  $g(P_{wi})$ .

## 2. Baza danych

Wyniki wykorzystane w niniejszej pracy uzyskano z badań turbozespołów 200 MW, podstawowego typu w krajowej energetyce zawodowej. Wybrano spośród nich te, które można uznać za jednokowe konstrukcyjnie. Ogółem analizą objęto 11 turbozespołów. Moc czynna podczas pomiarów zawierała się w zakresie 140 ÷ 205 MW.

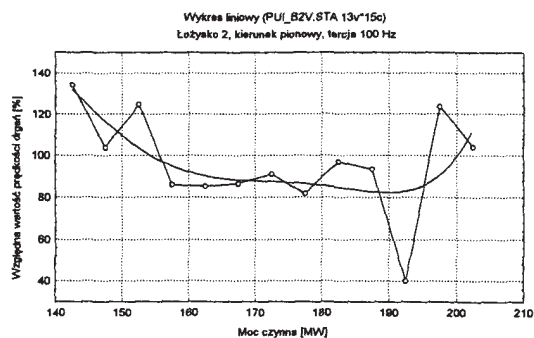
Symptomami rozpatrywanymi w poniższych rozważaniach są poziomy prędkości drgań bezwzględnych, rejestrowanych na łożyskach i kadłubie części niskoprężnej. Dla każdego turbozespołu pomiar wykonywano w dziewięciu punktach (siedem łożysk i dwa punkty na kadłubie), w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach. Stosowano analizę trzecjową i zakres częstotliwości 10 kHz. Na podstawie modelu wibrodiagnostycznego turbiny 200 MW [4] wytypowano te pasma widm trzecjowych, w których poziomy prędkości drgań przyjęto jako symptomy diagnostyczne. Obejmowały one zarówno zakres częstotliwości harmoniczných (cztery pierwsze harmoniczne i składowa 0.5f<sub>0</sub>), jak i łopatkowych [5]. Łącznie analizowano 135 symptomów z zakresu częstotliwości harmoniczných i 105 symptomów z zakresu częstotliwości łopatkowych.

## 3. Analiza danych

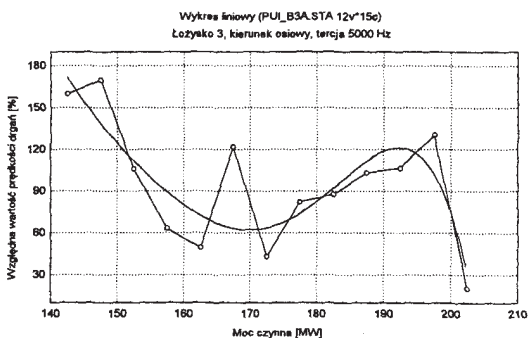
Wszystkie pomiary, których wyniki wykorzystano w prezentowanej tu analizie, wykonano w stanie ustalonym, z reguły podczas pracy turbozespołu w systemie automatycznej regulacji częstotliwości i mocy (ARCM). W praktyce oznacza to możliwość wahań mocy czynnej w trakcie cyklu pomiarowego rzędu pojedynczych megawatów. Z tego względu cały zakres mocy podzielono na przedziały co 5 MW i uśredniano wyniki w każdym z nich, odnosząc następnie uzyskaną średnią do wartości mocy odpowiadającej środkowi danego przedziału. Dla ułatwienia porównań ilościowych na wykresach przedstawiano nie bezwzględną wartość symptomu, lecz jej stosunek do średniej ze wszystkich wyników, wyrażony w procentach. Przykłady przedstawiono na rys.1 i 2, odpowiednio dla zakresu częstotliwości harmoniczných i łopatkowych. Krzywe na wykresach przedstawiają aproksymację wielomianową (wykorzystano w tym celu program Statistica™).

Ze względu na różnice mechanizmów generacji drgań w zakresie harmonicznym i łopatkowym [4] można spodziewać się, że zależności od mocy także będą się różnić. Doświadczenia z badań turbozespołów 200 MW skłaniają do jakościowego wniosku, że zależność ta jest silniejsza dla zakresu częstotliwości łopatkowych. Analiza wyników eksperymentalnych potwierdza ten wniosek, co można zauważyć, porównując maksima i minima poziomów prędkości drgań. Dla 135 symptomów z zakresu

częstotliwości harmoniczných średnia wartość minimum wyniosła 57.66% średniej ze wszystkich zarejestrowanych wartości danego symptomu, zaś maksimum – 155.28%; dla 105 symptomów z zakresu częstotliwości łopatkowych otrzymano odpowiednio 40.44% i 170.42% - różnica jest widoczna.



Rys.1. Przykład zależności względnej wartości symptomu od mocy dla zakresu harmonicznego



Rys.2. Przykład zależności względnej wartości symptomu od mocy dla zakresu łopatkowego

Dla zakresu harmonicznego zależność od mocy wydaje się wykazywać pewną regularność. Przykład z rys.1 można tu uznać za reprezentatywny. Dla niskich mocy (mniej więcej poniżej 160 MW) wahania są dość duże, następnie przebieg jest stosunkowo płaski i dopiero na końcu zakresu ponownie występują znaczniejsze wahania. W związku z tym ekstrema zależności prędkości drgań od mocy w większości przypadków znajdują się w pobliżu dolnej lub górnej granicy rozpatrywanego zakresu mocy. Wskazują na to dane z tabeli 1, gdzie przedstawiono liczbę maksimów i minimów przypadających na kolejne przedziały tego zakresu.

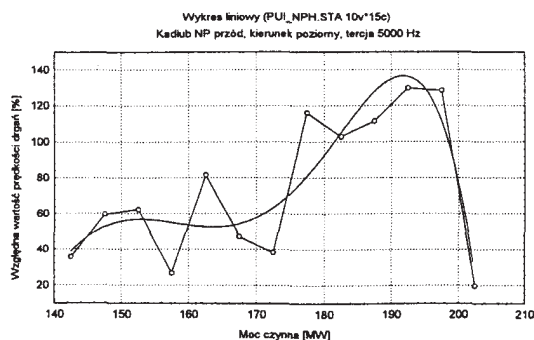
Podobna ocena przebiegów rozpatrywanej zależności dla symptomów z zakresu łopatkowego prowadzi, co interesujące, do zbliżonych wniosków ogólnych. Przebiegi te są w stosunku do zakresu harmonicznego mniej regularne, a wahania większe, lecz rozkład liczby ekstremów w poszczególnych przedziałach mocy jest, jak widać w tabeli 1, po-



dobny. Warto tu zauważyć, że wiąże się to z charakterystycznym obniżeniem poziomów drgań łopatkowych części niskoprężnej w górnej części rozpatrywanego zakresu mocy, widocznym zwłaszcza dla punktów zlokalizowanych od strony części średnio-prężnej (łożysko 4 i przód kadłuba); przykład przedstawiono na rys.3. Powtarzalność tego zjawiska jest interesująca i wymagało ono głębszego przeanalizowania, w szczególności wpływu próżni (zamknięte i otwarte układy chłodzenia). Pozostałe wyniki dla zakresu częstotliwości łopatkowych nie wykazują już tak wyraźnych cech charakterystycznych.

Tabela 1: Liczba ekstremów zależności prędkości drgań od mocy czynnej w poszczególnych przedziałach

Zakres mocy czynnej	Zakres częstotliwości			
	harmoniczny		łopatkowy	
	minima	maksima	minima	maksima
141 – 145	21	10	12	2
146 – 150	23	7	13	12
151 – 155	7	12	2	7
156 – 160	28	7	18	8
161 – 165	17	25	16	18
166 – 170	2	0	1	6
171 – 175	4	8	5	5
176 – 180	0	12	0	1
181 – 185	0	3	0	7
186 – 190	3	13	0	5
191 – 195	7	3	2	13
196 – 200	0	9	0	8
201 - 205	25	26	34	13



Rys.3. Przykład obniżenia poziomu drgań składowej łopatkowej części niskoprężnej dla najwyższych mocy czynnych

Obserwowane w szeregu przypadków zawyżenie poziomów drgań łopatkowych w dolnej części rozpatrywanego zakresu mocy pozostaje zapewne w

związku z niesymetrycznym dopływem pary w przypadku stosowania regulacji grupowej. Turbiny 200 MW są wyposażone w cztery grupy przyrządów rozprężnych, z których ostatnia powinna zasadniczo pracować powyżej mocy ekonomicznej [6]. Przy niższych obciążeniach zasilanie stopnia regulacyjnego parą jest zatem silnie niesymetryczne, co powoduje nierównomierność przepływu i przyczynia się do zauważalnego wzrostu poziomów drgań łopatkowych.

W praktyce czwarty zawór regulacyjny, sterujący dopływem pary do ostatniej grupy przyrządów rozprężnych, otwiera się często już przy mocy nominalnej, a nawet nieco poniżej. Wynika to z problemów z utrzymaniem nominalnych parametrów pary, a niekiedy również próżni w skraplaczu. Turbina pracuje wówczas z maksymalnym przetykiem, lecz równocześnie przepływ pary jest bardziej równomierny niż przy niższych obciążeniach. W efekcie składowe harmoniczne wykazują w szeregu przypadków niewielki wzrost, natomiast składowe łopatkowe – spadek.

Ważnym wnioskiem z tabeli 1 jest to, że dla zminimalizowania wpływu mocy czynnej na poziom symptomów drganiowych (np. w procedurach obliczania wartości granicznych) w turbozespołach tego typu wskazane jest w ramach selekcji danych wejściowych odrzucić wyniki uzyskane przy mocy poniżej 165 MW i powyżej 200 MW. Warto zwrócić uwagę, że w przypadku bloków energetycznych pracujących jako podstawowe – jak to ma miejsce dla bloków 200 MW - nie prowadzi to do znacznego zmniejszenia rozmiarów bazy danych: w rozpatrywanym tu przypadku byłoby to jedynie 13% wszystkich wyników. Zabieg ten powinien przynieść poprawę wiarygodności wnioskowania i dokładności szacowania wartości granicznej w przypadku, kiedy brak jest danych dla przeprowadzenia normalizacji zmierzonych wartości symptomu względem mocy czynnej

W analizie trendów drgań turbozespołów 200 MW stwierdzano niejednokrotnie duże wahania składowych łopatkowych rejestrowanych na łożysku 1, w mniejszym stopniu także na łożysku 2. Sugerowałoby to, że zależność od mocy czynnej powinna być dla tych właśnie składowych szczególnie silna. W opisywanej tu analizie przypuszczenie to nie potwierdziło się. Dla łożyska 1 średnia wartość minimum z zakresu łopatkowego wyniosła 35,25% średniej z całego zakresu mocy, maksimum – 172,78%. Są to zatem wartości jedynie minimalnie przekraczające te, jakie stwierdzono dla wszystkich składowych łopatkowych w ogóle (patrz wyżej). Dla łożyska 2 są one nawet niższe: odpowiednio 43,53% i 168,28%. Potwierdza to wysuwane już poprzednio przypuszczenie, że wspomniane wyżej wahania nie są związane jedynie ze zmianami stanu technicznego układu przepływowego, a źródłem drgań w tym

zakresie częstotliwości są w znacznej części inne zjawiska, najprawdopodobniej związane z pracą mechanizmów znajdujących się w przednim stojaku turbiny.

#### 4. Podsumowanie

Określenie wiarygodnych zależności poziomu symptomów drganiowych od mocy czynnej (jednoznacznie powiązanych z występującą we wzorze (4) funkcją  $g(P_{in})$ ) pozwoliłoby na korekcję wartości tych symptomów rejestrowanych przy różnych obciążeniach, zanim zostaną one wykorzystane w charakterze wielkości wejściowych do procedur obliczania wartości granicznych. Przedstawiona powyżej, wstępna analiza upoważnia przede wszystkim do stwierdzenia, że zależność prędkości drgań bezwzględnych w poszczególnych pasmach tarczowych od mocy nie może być uznana za pomijalną, szczególnie w skrajnych przedziałach rozpatrywanego zakresu.

Zastosowana tu procedura uśredniania w poszczególnych przedziałach wartości mocy czynnej pozwala na minimalizację wpływu innych czynników na rejestrowaną wartość symptomu. Jest to szczególnie istotne wobec praktycznej niemożności realizacji czynnych eksperymentów diagnostycznych w warunkach energetyki zawodowej. Warto tu podkreślić, że wyniki pomiaru wykonanego w trakcie rozruchu turbozespołu nie mogą być uznane za miarodajne, gdyż moc nominalna jest z reguły osiągana na długo przed ustabilizowaniem się temperatur i wydłużeń cieplnych (proces ten trwa kilkadziesiąt godzin, niekiedy nawet dłużej). Nie są to zatem warunki odpowiadające stanowi ustalonemu.

Uzyskane przy pomocy opisanej wyżej procedury charakterystyki można uznać za punkt wyjścia do opracowania danych ilościowych dla korekcji wyników zarejestrowanych przy różnych obciążeniach turbozespołu. Poprawy dokładności można niewątpliwie poszukiwać przez rozszerzenie dostępnej bazy danych. Dotyczy to zwłaszcza dolnych przedziałów rozpatrywanego tu zakresu częstotliwości; nie można wykluczać, że większa liczba wyników z tego zakresu dałaby w efekcie nieco mniejsze wahania zależności prędkości drgań od mocy.

Określenie zależności wartości symptomów drganiowych od mocy czynnej nie oznacza jeszcze, że zależność (3) może już być wykorzystywana do obliczeń wartości granicznych. Analiza wpływu wektora logistycznego (nawet jeśli zastosujemy uproszczenie w postaci zastąpienia go jego miarą skalarną) i degradacji nieodwracalnej jest problemem równie istotnym i wymagającym analizy dużej liczby danych, obejmujących długie okresy czasu. Dotyczy to zwłaszcza identyfikacji zależności od zaawansowania degradacji nieodwracalnej, gdyż procesy wpływające na tę zależność są bardzo powolne. Prace w tym zakresie są obecnie prowadzone, również w oparciu o dane uzyskane dla turbin 200 MW, w tym także poddawanych modernizacjom o różnych zakresach.

Praca została wykonana w ramach projektu badawczego nr 7 T07B 041 16, finansowanego przez Komitet Badań Naukowych.

#### Literatura

1. C.Cempel: *Theory of energy transforming systems and their application in diagnostics of operating systems*. Applied Mathematics and Computer Science, 1993, vol.3, No.3, pp.533 - 48
2. H.G.Natke, C.Cempel: *Model-Aided Diagnosis of Mechanical Systems*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1997
3. T.Gałka: *Zastosowanie modelu procesora energii do określania granicznych poziomów drgań turbozespołów parowych*. Energetyka, Nr 1/2000 (547), str. 21-29
4. Z.Orłowski: *Wibrodiagnostyka turbin parowych*. Prace Instytut Energetyki, zeszyt 18. Warszawa, 1989
5. Z.Orłowski, T.Gałka: *Diagnozowanie układów przepływowych maszyn wirujących w częstotliwościach łopatkowych*. Materiały VIII Krajowej Konferencji "Diagnostyka Pojazdów i Maszyn Roboczych", Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 1993, s.179-188
6. T.Nikiel: *Turbiny parowe*. Wyd. III. WNT, Warszawa,